

文章编号:1671-1637(2012)01-0055-08

内河船舶跟驰间距模型

何良德¹, 姜 晔², 殷兆进², 周 博¹, 唐 晖¹

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 江苏省交通规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210004)

摘 要:为研究内河船舶流特性,基于船舶制动机理,分析了船舶制动距离与船长、航速的相关性,给出了制动距离的经验公式,考虑驾驶员经验对实际制动距离的影响,建立了船舶跟驰间距模型。结合江苏地区机动单船、顶推船队、拖驳船队3类船型实例分析,通过与内河船舶领域长轴经验值、100 t 机动单船的分段线性模型结果的对比,确定了间距模型参数。研究表明:3类船型的制动距离分别与单船、船队、最大单驳长度相关,计算长度系数分别为5.98、2.73、17.41,前2类船型的制动距离与航速的平方成正比,拖驳船队与航速的0.85次方成正比;驾驶员的制动操作系数、操作指数应取0.78、2.5。

关键词:内河船舶;跟驰间距模型;制动距离;计算长度系数;制动操作系数;制动操作指数

中图分类号:U675.58

文献标志码:A

Following distance model of inland ship

HE Liang-de¹, JIANG Ye², YIN Zhao-jin², ZHOU Bo¹, TANG Hui¹

(1. School of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China;

2. Jiangsu Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210004, Jiangsu, China)

Abstract: In order to study the characteristics of inland ship flow, the correlation among breaking distance, ship length and speed was analyzed, the empirical equation of breaking distance was given based on ship breaking mechanism. The impact of operator experience on actual breaking distance was considered, and the following distance model of inland ship was established. Combined with instance analysis including single motorship, pushing fleet and towing fleet in Jiangsu, the parameters of following distance model were determined by analyzing the empirical value of major axis for inland ship domain and the computing value of piecewise linear model of 100 t single motorship. Analysis result shows that the breaking distances of 3 ship categories are related to the lengths of single ship, fleet and the longest barge, and the calculated length coefficients are 5.98, 2.73 and 17.41 respectively. The breaking distances of single motorship and pushing fleet are in direct proportion to the square of ship speed, the breaking distance of towing fleet is in direct proportion to the 0.85th power of ship speed. The breaking operation coefficient and index of ship operator are determined as 0.78 and 2.5 respectively. 3 tabs, 9 figs, 17 refs.

Key words: inland ship; following distance model; breaking distance; calculated length coefficient; breaking operation coefficient; breaking operation index

Author resume: HE Liang-de (1964-), male, associate professor, +86-25-83786540, hldhsy@163.com.

收稿日期:2011-09-26

基金项目:江苏省交通科学研究计划项目(2006R17, 2010Y21-1)

作者简介:何良德(1964-),男,上海人,河海大学副教授,从事港口与航道工程研究。

0 引 言

航道通过能力包括过货能力和过船能力,船舶管理部门关注船舶安全,大多基于船舶领域理论^[1]进行过船能力的研究^[2]。航道部门重点研究过货能力,20 世纪 70 年代从德国公式开始,各地区结合航道条件、船型发展、运营组织等特点提出了多种公式,如长江公式、川江公式、闵朝斌公式等。目前,各种过船能力、过货能力计算公式都是基于以下公式衍生发展起来的,即

$$f = ku \quad (1)$$

$$k = 1\,000/h$$

$$h = (1 + \varphi)L_t$$

$$q = n_b f = \rho u$$

$$\rho = n_b k = 1\,000n_b/h$$

$$Q = qW_b = Ku$$

$$K = \rho W_b$$

$$C_h = m_r \beta_1 \beta_2 \beta_3 Q$$

式中: f 为船队流量(队·h⁻¹),单艘货船以 1 个船队计; k 为船队密度(队·km⁻¹); h 为船头间距,又称船舶领域纵轴长度(m); φ 为船舶间距系数; L_t 为船舶(队)总长度(m); u 为船舶时速(km·h⁻¹); q 为船舶流量(艘·h⁻¹); n_b 为船队的驳船总数,机动单船取 n_b 为 1; ρ 为船舶密度(艘·km⁻¹); Q 为船舶吨位流量(t·h⁻¹); W_b 为货船或驳船额定载重吨位(t); K 为船舶吨位密度(t·km⁻¹); C_h 为航道小时船舶通过能力(t·h⁻¹); m_r 为航道线数; β_1 为船舶追越、交会时引起的航速损失系数; β_2 为驾驶员条件的修正系数; β_3 为交通流密度增大使运行阻力增加而产生的折减系数。

由以上分析可以看出,船舶流量 q 是通过能力计算的基础。采用传统方法计算 q 时,将航行时速 u 与船舶密度 ρ 当作定值,没有考虑两者相互影响,缺乏动态分析,无法直观反映航道的交通状态,由此引入的修正系数 β_2 、 β_3 也难以定量分析确定。

进入 21 世纪以后,邵长丰等应用流体模型,对船舶流进行了探索性的动态分析^[3];董宇等基于船舶领域理论和 Greenshields 分段线性模型,分析了船舶流交通状态,并首次提出和划分了航道服务水平等级,可以评价航道负荷程度和服务质量^[4];余劲等分别应用流体动力学理论^[5]、跟驰理论^[6]、时间阻抗模型^[7]研究了船舶交通流特性,探讨了船舶当量换算系数^[8],提出了服务水平的有效度量指标^[9]。近年来的研究主要借鉴公路交通流理论,加强了船

舶交通机理的分析,推进了内河交通工程学发展,但这些模型的研究主要是围绕机动单船进行的,尚未充分考虑内河船舶(队)尺度大、速度低、制动机理差异大等船舶流特点,限制了研究成果的实用性。

本文着重从内河船舶行驶特性出发,研究船舶的畅行速度、制动距离,分析船舶领域、安全间距的影响因素,从而建立船舶跟驰间距计算模型,可以分析航道的交通状态,避免引入和确定 β_2 、 β_3 ,并分别研究了机动单船、顶推船队、拖驳船队等不同类别船舶流特性,为混合交通条件下的航道通过能力及服务水平研究奠定了基础。

1 内河船舶行驶性能

1.1 船舶航行阻力

1.1.1 船舶的水流阻力

内河船舶水流阻力计算常采用兹万科夫法^[10],机动钢质自航船的水流阻力为

$$R_m = C_f S v^{1.83} + C_r \delta A_0 v^{1.7+4F_n} \quad (2)$$

$$C_f = K_0 [1.34 + 2.53/(2.68 + L_w)]$$

$$K_0 = 1 + 0.004\,3(15 - t_w)$$

$$S = L_w(\mu H + \delta B)$$

$$\delta = D/(L_w B H)$$

$$C_r = 174 m_0 \delta^{2.5} / [(L_w/6B)^3 + 2]$$

$$A_0 = \beta B H$$

$$F_n = v/\sqrt{gL_w}$$

式中: R_m 为货船、拖轮或推轮等机动船水流阻力(N); C_f 为摩擦阻力系数; L_w 为船舶水线长度(m); K_0 为水温影响系数; t_w 为水温(°C); S 为船舶浸湿面积(m²); μ 为系数变量,机动船取 1.8,驳船取 2.0; H 为船舶吃水(m); δ 为船舶方形系数,机动船为 0.58~0.60,普通驳船为 0.75~0.80,分节驳船约为 0.90; B 为船舶水线宽度(m); D 为船舶排水量(t); C_r 为剩余阻力系数; m_0 为系数变量,对无导流罩的螺旋桨船取 1.0,有导流罩时取 1.2; A_0 为舢横剖面面积(m²); β 为舢横剖面系数,机动船 β 为 0.93,驳船 β 为 0.95~0.99; v 为船舶对水速度(m·s⁻¹),在江苏水网地区可以忽略水流速度影响, v 等于船舶对岸航速; F_n 为船舶佛汝德数; g 为重力加速度。

驳船是非机动船,其水流阻力为

$$R_b = R_b^f + R_b^r \quad (3)$$

$$R_b^f = C_f S v^{1.83}$$

$$R_b^r = C_r \delta A_0 v^{1.7+0.03v}$$

式中: R_b 、 R_b^f 、 R_b^r 分别为驳船水流阻力、摩擦阻力、剩余阻力(N)。

1.1.2 3 类船舶(队)航行阻力

船舶的水流阻力是船舶航行阻力的主要组成部分,船队航行阻力由拖轮(或推轮)阻力和驳船阻力两大部分组成,对于顶推船队需将驳船的摩擦阻力和剩余阻力分开计算^[11],3 类船舶(队)航行阻力 R_v 分别如下。

机动单船航行阻力为

$$R_{v1} = R_m \quad (4)$$

拖驳船队航行阻力为

$$R_{v2} = \sigma(R_m + \sum_{i=1}^{n_b} R_{b,i}) \quad (5)$$

顶推船队航行阻力为

$$R_{v3} = \sigma(R_m + \sum_{i=1}^{n_b} R_{b,i}^f + \sum_{j=1}^{n_r} R_{b,j}^r) \quad (6)$$

式中: n_r 为驳船列数,江苏地区一般为单列, n_r 为 1; $R_{b,i}$ 、 $R_{b,i}^f$ 分别为第 i 艘驳船水流阻力、摩擦阻力(N); $R_{b,j}^r$ 为第 j 列首行驳船剩余阻力(N); σ 为驳船编队系数,由实船试验确定,2~3 行的单列式顶推船队 σ 为 0.75~0.90,拖驳船队 σ 约为 1.00。

1.2 船舶设计速度

船舶满载时,航行阻力最大,此时船舶可以达到的最大速度称为设计速度,应满足的条件为

$$v_f R_f \leq P_e = \xi_e P_m \quad (7)$$

式中: v_f 为船舶设计速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); R_f 为船舶满载航速为 v_f 时航行阻力(N); P_m 为船舶主机额定功率(W); P_e 为有效输出功率; ξ_e 为推进效率,一般在 0.50~0.70。

在工程实践中,常以时速 u 表示船舶速度,船舶航速 v 与时速 u 换算关系为

$$v = u/3.6 \quad (8)$$

与船舶设计速度 v_f 对应的 u_f 称为设计时速,又称畅行速度。

1.3 船舶制动性能

1.3.1 倒车制动性能

机动单船、顶推船队可以采用倒车进行紧急制动,为不致造成主机转动部件出现应力过大的情况,在关闭主机油门后,通常要等航速降至设计速度的 60%~70%,转速降至额定转速的 25%~35%时,方可将压缩空气持续充入汽缸使主机停转(第 1 阶段),然后进行反向起动的第 2 阶段,从主机接收命令开始动作直至船舶对水停止移动所航进的路程称为倒车冲程。

忽略螺旋桨阻力,在第 1 阶段中船舶运动微分方程可以写为^[12]

$$(m_s + m_w)a = -R_v \quad (9)$$

$$a = \frac{dv}{dt} \quad v \in (v_0, v_1)$$

式中: m_s 、 m_w 分别为船舶(队)质量及其附加水质量(kg); v_0 、 v_1 分别为制动开始时速度、第 1 阶段末速度,对应的时速分别为 u_0 、 u_1 ; a 为船舶加速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); t 为时间。

第 2 阶段在船舶倒车拉力的作用下,船舶运动微分方程为

$$(m_s + m_w)a = -T_p^b - R_v \quad v \in (v_1, 0) \quad (10)$$

式中: T_p^b 为船舶后退的倒车拉力(N),对机动货船, T_p^b 为 $P_m/12.5$,对 ZP 型拖轮,为 $P_m/5.56$,对 CPP 型拖轮,为 $P_m/9.27$ 。

1.3.2 停车制动性能

拖驳船队的拖轮、驳船之间常采用柔性连接,因此,一般不采用倒车制动,只能依靠航行阻力降低船队的航速。通常以船速降至维持舵效的最小余速时作为停车制动完成的判别标准,该淌航行程称为停车冲程。拖驳船队停车制动微分方程同式(9),此时, $v \in (v_0, v_r)$, v_r 为余速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。实践表明,当剩余时速 $u_r \leq 1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,拖驳船队的动能已经很小,可按式(8)换算确定余速 v_r 。

1.3.3 制动距离求解

机动单船、顶推船队的倒车冲程和拖驳船队的停车冲程统称为制动距离。制动距离 s_b 可根据微分方程式(9)、(10)采用差分方法求得。求解时,航行阻力 R_v 应根据船型类别、船舶航速及吃水分别应用式(4)~(6)计算。

2 江苏地区船舶行驶性能分析

本文主要根据《京杭运河运输船舶标准船型主尺度系列》(2005 年版)对 3 类船舶(队)的($W_{1.0}$, $u_{1.0}$)、($W_{0.5}$, $u_{1.0}$)、($W_{0.5}$, $u_{0.8}$)3 种状态,分别进行行驶性能分析, $W_{1.0}$ 为满载, W_0 为空载, $W_{0.5}$ 为半载, $u_{1.0} = u_f$,表示全速, $u_{0.8} = 0.8u_f$ 。

2.1 机动单船行驶特性

机动单船的设计时速 u_f 为 12~14 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$,平均为 13 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$,制动距离 s_b 与单船长度 L_m 有较好的相关性(图 1),在 3 种状态时,制动距离 s_b 分别是单船长度 L_m 的 7.41、5.98、3.97 倍。船舶载质量分别取 W_0 、 $W_{0.5}$ 、 $W_{1.0}$ 时, s_b 是 u_0 的 1.93、1.96、1.97 次幂函数,因此, s_b 近似与 u_0^2 成正比,具

体见图 2。

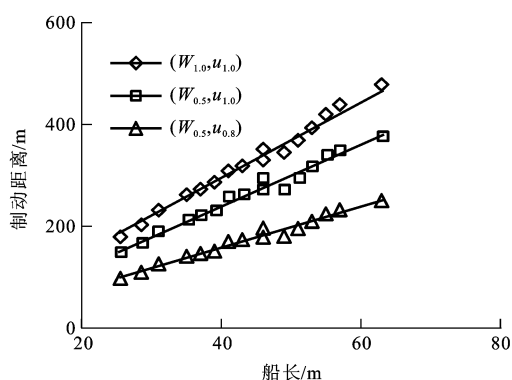


图 1 机动单船制动距离与船长关系

Fig. 1 Relationships between breaking distances and lengths for single motorship

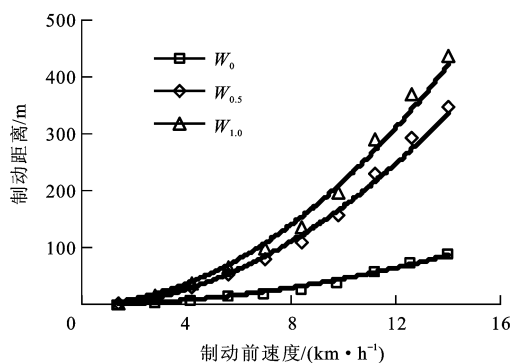


图 2 1 000 t 干散货船制动距离与速度关系

Fig. 2 Relationships between breaking distances and speeds for 1 000 t dry bulk carrier

2.2 顶推船队行驶特性

顶推船队设计时速 u_f 为 $10.7 \sim 13.6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 平均为 $12 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。顶推船队驳船数较少, 推轮的质量以及承受的阻力在船队中占较大比例, 另外, 航速高时, 船队周围的流场更接近于船长等同于船队长的单船, 因此, 制动距离 s_b 与船队长度 L_f 有更好的相关性。在 3 种状态时, 制动距离 s_b 分别是船队长度 L_f 的 3.60、2.73、1.80 倍。

与机动单船相似, 驳船载质量不变时, 顶推船队的 s_b 近似与 u_0^2 成正比。

2.3 拖驳船队行驶特性

拖驳船队的设计时速 u_f 为 $7.8 \sim 9.6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 平均为 $8.4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。拖驳船队的驳船数一般较多, 拖轮的航行阻力可忽略不计, 由式(5)可以看出, 驳船相同时, 拖驳船队与单驳的停车冲程接近相等。取 u_r 为 $1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 制动距离 s_b 与驳船长度 L_b 有更好的相关性(图 3), 在 3 种状态时, 制动距离 s_b 分别是驳船长度 L_b 的 21.27、17.41、15.22 倍。驳船

载质量取 W_0 、 $W_{0.5}$ 、 $W_{1.0}$ 时, s_b 分别是 $u_0 - u_r$ 的 0.58、0.63、0.66 次幂函数, 有较好的相关性, s_b 表示为 u_0 的幂函数时, 指数分别为 0.75、0.85、0.92。内河船舶的平均装载一般接近 $W_{0.5}$, s_b 近似与 $u_0^{0.85}$ 成正比, 1 拖-7 $\times 500 \text{ t}$ 船队制动距离与速度关系见图 4。

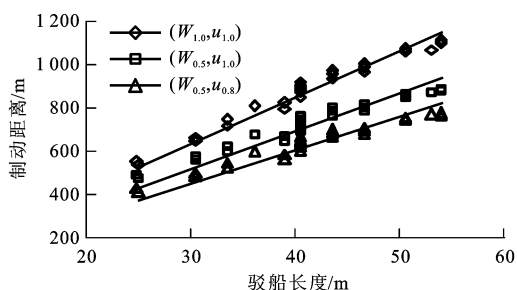


图 3 拖驳船队制动距离与驳船长度关系

Fig. 3 Relationships between braking distances and barge lengths for towing fleet

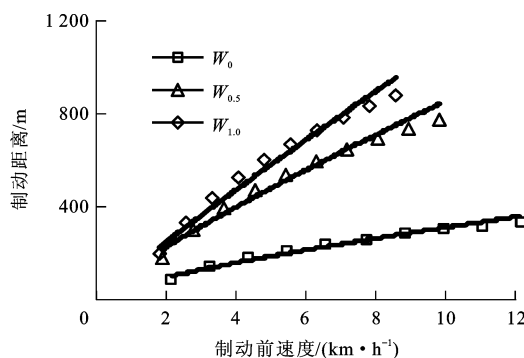


图 4 1 拖-7 $\times 500 \text{ t}$ 船队制动距离与速度关系

Fig. 4 Relationships between breaking distances and speeds for 7 $\times 500 \text{ t}$ towing fleet

2.4 制动距离经验公式

根据江苏地区船舶行驶特性分析, 3 类船舶(队)的制动距离 s_b 可以统一表述为

$$s_b = \xi_u^m \alpha L_c \quad (11)$$

$$\xi_u = u/u_f$$

式中: L_c 为船舶(队)计算长度(m), 机动单船、顶推船队、拖驳船队分别取单船长度 L_m 、船队长度 L_f 、驳船长度 L_b ; α 为计算长度系数, 在 3 种状态时依次分别为 $\{7.41, 3.60, 21.27\}$ 、 $\{5.98, 2.73, 17.41\}$ 、 $\{3.97, 1.80, 15.22\}$; ξ_u 为相对速度; m 为航速影响指数, 分别取 2.00、2.00、0.85。

3 船头间距与船舶领域关系

3.1 船舶安全间距

以前船开始制动时为考察时刻, 前船完成制动时距离后船的初始位置 s_2 为

$$s_2 = s_0 + s_{b2}$$

式中: s_{b2} 为前船的制动距离; s_0 为前船制动前两船净间距。

对后船而言,从发现前方态势并发出命令到主机开始动作这段时间内,后船行驶反应距离 s_r ,后船开始制动后行驶距离 s_{b1} ,故后船移动的距离 s_1 为

$$s_1 = s_r + s_{b1}$$

在两船先后完成制动时,两者的距离应大于安全余量 s_m ,即 $s_2 - s_1 \geq s_m$,可得

$$s_0 \geq s_m + s_r + s_{b1} - s_{b2} \quad (12)$$

整理得

$$s_0 = s_m + s_r + k_b s_{b1} \quad (13)$$

$$k_b = 1 - s_{b2} / s_{b1}$$

$$s_r = v t_r$$

式中: k_b 为制动操作系数; t_r 为后船反应时间,包括驾驶员反应时间(0.5~1.5 s)及其动作时间(0.7~1.0 s)和主机接收命令时间(4~6 s)^[12],可取 t_r 为 10 s;单船安全余量 s_m 为 10 m,船队 s_m 为 25 m。

令前后船制动距离相等,即 $s_{b1} = s_{b2}$, $k_b = 0$,由式(13)可得最小安全间距 s_{\min} 为

$$s_{\min} = s_m + s_r \quad (14)$$

设前船突然“挡墙式”停车倒车制动, s_{b2} 为 0, k_b 为 1,由式(13)可得最大的绝对安全间距 s_{\max} 为

$$s_{\max} = s_m + s_r + s_{b1} \quad (15)$$

由于很难精确估计前船的制动性能、制动行为,驾驶员只能凭经验根据本船的速度和制动性能来控制制动距离。为了航行安全和船运效率,驾驶员实际的制动操作系数 $k_b < 1$,同时船速越高制动越难控制,驾驶员留有的富裕量越大,这里引入速度项 ξ_u^n 反映船速对驾驶员产生的心理影响,因此,实际安全间距 s_p 为

$$s_p = s_m + s_r + k_b \xi_u^n s_b \quad (16)$$

$$s_{\min} \leq s_p \leq s_{\max}$$

式中: n 为制动操作指数。

3.2 船头间距

将式(11)代入式(16),并计入 L_t ,得船头间距 h 为

$$h = h_j + t_r u / 3.6 + k_b \xi_u^{n+m} \alpha L_c \quad (17)$$

$$h_1 \leq h \leq h_2$$

$$h_1 = h_j + t_r u / 3.6$$

$$h_2 = h_j + t_r u / 3.6 + \xi_u^n \alpha L_c$$

$$h_j = s_m + L_t$$

式中: h_j 为阻塞时船头间距(m); h_1 为 s_{\min} 时船头间

距(m); h_2 为 s_{\max} 时船头间距(m)。

3.3 船舶领域

船舶领域分为基于解析表达^[12]、统计方法^[13-15]和智能技术的领域模型^[16],徐周华等通过理论分析、现场实测以及问卷调查等方法,进行了内河船舶领域的研究^[12-14,17],主要结果列于表 1 中,表中主要是关于机动单船的船舶领域,其长轴建议取 $(3 \sim 5)L_m$,平均为 $(3.5 \sim 3.8)L_m$ 。船舶营运时,有的满载 $W_{1.0}$,有的空载 W_0 ,平均接近半载 $W_{0.5}$,出于经济性考虑,营运速度大多保持在设计时速 u_f 的 0.8 倍,因此,调查所得的船舶领域纵长相当于 $(W_{0.5}, u_{0.8})$ 时船头间距 h 。

表 1 内河航道船舶领域研究成果

Tab. 1 Research results of ship domain in inland waterway

研究者	船舶种类	纵向长度	横向长度	研究方法
徐周华	进江海船	$(3 \sim 4)L_m$	$(0.5 \sim 0.8)L_m$	理论分析,结合实船试验
	顶推船队	$(2 \sim 3)L_f$	$0.4L_f$	
刘绍满	长 40 m 的单船居多	$4.8L_m$	$3.2L_m$	长江镇江段,雷达图像
		$(3.2 \sim 4.5)L_m$	$(2.5 \sim 3.6)L_m$	主观问卷调查
周崇喜	3 000 t 以下单船为主	$3.4L_m$	$3.2L_m$	长江航道,船员问卷调查
童亮	单船	$(2 \sim 4)L_m$		苏南运河,理论分析
	拖驳船队	$(2 \sim 4)L_b + L_f$		

4 船舶跟驰间距模型及应用

4.1 跟驰间距模型公式

由阻塞时船头间距 h_j 可得

$$\rho_j = 1\,000n_b/h_j \quad (18)$$

式中: ρ_j 为船舶阻塞密度(艘·km⁻¹)。

船速 u 越高,要求的 h 也越大,当 u 等于 u_f 时,式(17)要求的船头间距、密度分别为

$$h_f = h_j + t_r u_f / 3.6 + k_b \alpha L_c \quad (19)$$

$$\rho_f = 1\,000n_b/h_f$$

式中: h_f 为畅行时要求的最小船头间距(m); ρ_f 为船舶流转折密度(艘·km⁻¹)。

当实际船头间距 $h_j \leq h \leq h_f$ 时,船速 u 与 h 相互制约、相互影响,式(17)决定的密度 ρ 为

$$\rho = \frac{1\,000n_b}{h_j + t_r u / 3.6 + k_b \xi_u^{n+m} \alpha L_c} \quad \rho_f \leq \rho \leq \rho_j \quad (20)$$

实际船头间距 $h > h_f$ 时,船舶(队)可以自由行驶($u \leq u_f$),可能的流量为

$$q = \rho u_f \quad 0 \leq \rho < \rho_f \quad (21)$$

根据以上分析,可将 3 类船舶流计算统一表达

为跟驰间距模型的关系式,即

$$q = \begin{cases} \rho u_f & 0 \leq \rho < \rho_f \\ \frac{1\ 000 n_b u}{h_j + t_r u / 3.6 + k_b \xi_u^{n+m} \alpha L_c} & \rho_f \leq \rho \leq \rho_i \end{cases} \quad (22)$$

式(22)第1段为斜率为 u_f 的直线,第2段为上凸曲线,交点处转折流量 $q_f = u_f \rho_f$,是畅行时最大流量。饱和时最大流量 q_e 发生在第2段曲线内,即

$$q_e = \frac{1\ 000 n_b u_f}{(n_1/n_2)^{n_1} \sqrt{k_b \alpha L_c n_2 h_j^{n_2}} + t_r u_f / 3.6} \quad (23)$$

$$n_1 = n + m$$

$$n_2 = n + m - 1$$

$$u_e = \sqrt{\frac{h_j}{n_2 k_b \alpha L_c}} u_f < u_f$$

$$\rho_e = \frac{1\ 000 n_b}{h_j + t_r u_e / 3.6 + k_b (u_e / u_f)^{n_1} \alpha L_c} > \rho_f$$

式中: q_e 、 ρ_e 、 u_e 分别为饱和时最大流量及其对应的密度、速度。

4.2 船舶流限界

式(17)表明 $h_1 \leq h \leq h_2$,从式(22)的推导可以看出,跟驰间距模型的 ρ 、 q 存在上下限界。

在式(19)~(22)推导过程中,令 k_b 为1, n 为0,可得绝对安全条件(船头间距为 h_2)时船舶流关系为

$$q_2 = \begin{cases} \rho_2 u_f & 0 \leq \rho_2 < \rho_{f2} \\ \frac{1\ 000 n_b u}{h_j + t_r u / 3.6 + \xi_u^m \alpha L_c} & \rho_{f2} \leq \rho_2 \leq \rho_i \end{cases} \quad (24)$$

$$\rho_{f2} = 1\ 000 n_b / (h_j + t_r u_f / 3.6 + \alpha L_c)$$

式中: q_2 、 ρ_2 、 ρ_{f2} 分别为绝对安全条件下船舶流量、密度、转折密度。

同理,令 k_b 为0,可得最小安全条件(船头间距为 h_1)时船舶流关系为

$$q_1 = \begin{cases} \rho_1 u_f & 0 \leq \rho_1 < \rho_{f1} \\ \frac{1\ 000 n_b u}{h_j + t_r u / 3.6} & \rho_{f1} \leq \rho_1 \leq \rho_i \end{cases} \quad (25)$$

$$\rho_{f1} = 1\ 000 n_b / (h_j + t_r u_f / 3.6)$$

式中: q_1 、 ρ_1 、 ρ_{f1} 分别为最小安全条件下船舶流量、密度、转折密度。

式(25)经变换后,可得船舶流流量-密度的两段式线性关系为

$$q_1 = \begin{cases} \rho_1 u_f & 0 \leq \rho_1 < \rho_{f1} \\ u_f \rho_{f1} \frac{\rho_i - \rho_1}{\rho_i - \rho_{f1}} & \rho_{f1} \leq \rho_1 \leq \rho_i \end{cases} \quad (26)$$

可以证明,船舶速度为 u 时,由式(22)、(24)、(25)计算的 (ρ, q) 、 (ρ_1, q_1) 、 (ρ_2, q_2) 在密度-流量平面内3点共线,斜率等于 u 值,且 $\rho_2 \leq \rho \leq \rho_1$, $q_2 \leq$

$q \leq q_1$ 。在 q_1 曲线上方的交通状态是不安全的, q_1 曲线是船舶流上限;在 q_2 曲线下方的交通状态是绝对安全的,行驶的速度不受安全间距限制,是一种“随意”自由流,一般流量较小, q_2 曲线可认为是船舶流下限。

4.3 模型参数验证

设计船型中最小的100 t 机动单船长度为25.5 m,是一种最接近铰接车车长的船型。本文认为100 t 单船交通流特性最接近于汽车流,利用 Greenshields 分段线性模型、Greenberg 分段对数模型,与船舶流的上下限界、跟驰间距模型相互比较,确定合适的 n 值;取 $(W_{0.5}, u_{1.0})$ 时 α 值,最后确定 k_b 值,使船舶在 $(W_{0.5}, u_{0.8})$ 时船头间距与船舶领域统计值接近。

从图5中看出,船舶吨级较小,船长较短时,线性模型曲线介于船舶流上下限曲线之间,而对数模型几乎与下限曲线重合,说明对数模型流量结果偏小。通过 n 在0.5~4.5之间变化时跟驰间距模型结果比较,可以看出 n 为2.5时,船舶流曲线接近分段线性模型曲线。

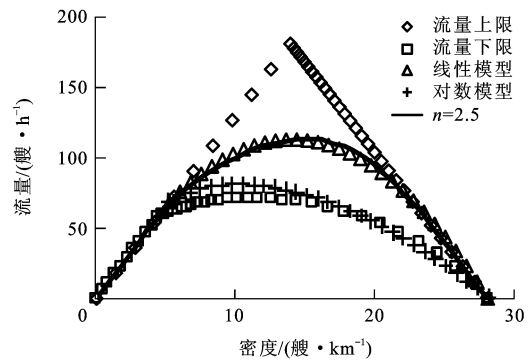


图5 100 t 机动单船船舶流模型比较

Fig. 5 Comparison of different ship flow models for 100 t single motorship

交通流上限曲线又称流密基本三角形,汽车流的基本三角形转折点均呈现偏左的特征,而船舶流的基本三角形大多呈现偏右的特征。船舶(队)尺度较小时,基本三角形稍偏左,接近居中(图5),随着船舶(队)尺度增大,三角形偏右严重(图6),此时线性模型曲线越来越接近甚至低于下限曲线,流量偏小,说明线性模型只适用于 $\rho_i \leq 0.5 \rho_j$ 尺度较小的船舶(队),不适用于 $\rho_i > 0.5 \rho_j$ 大尺度的船舶(队)。以上比较分析可知,基于船舶制动性能、驾驶员操作行为分析的跟驰间距模型是适用于各类船舶(队)的统一模型。模型相关参数见表2。

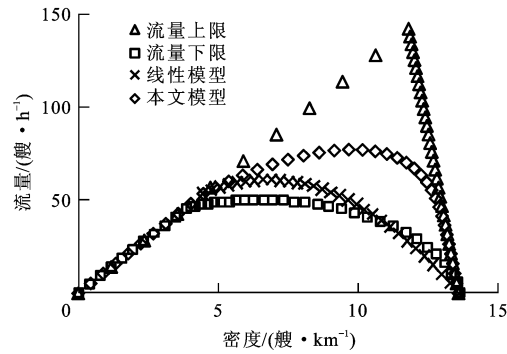


图 6 1 顶-3×1 000 t 船队船舶流模型比较
Fig. 6 Comparison of different ship flow models for 3×1 000 t pushing fleet

表 2 跟驰间距模型计算参数

Tab. 2 Calculation parameters of ship-following distance model							
船舶(队)	s_m/m	t_r/s	k_b	α	$u_f/(km \cdot h^{-1})$	n	m
机动单船	10	10	0.78	5.98	13.0	2.5	2.00
顶推船队	25	10	0.78	2.73	12.0	2.5	2.00
拖驳船队	25	10	0.78	17.41	8.5	2.5	0.85

表 3 代表船型船舶流参数

Tab. 3 Ship flow parameters of representative ship types															
船舶(队)	序号	吨级/t	$n_b/\text{艘}$	L_m 或 L_b/m	L_t/m	L_c/m	$u_f/(km \cdot h^{-1})$	$\rho_f/(\text{艘} \cdot km^{-1})$	$q_f/(\text{艘} \cdot h^{-1})$	$\rho_g/(\text{艘} \cdot km^{-1})$	$u_c/(km \cdot h^{-1})$	$\rho_c/(\text{艘} \cdot km^{-1})$	$q_c/(\text{艘} \cdot h^{-1})$	$Q_c/(10^4 t \cdot h^{-1})$	$\gamma_{q,f}$
机动单船	1	100	1	25.5	25.5	25.5	13.0	5.2	68.2	28.2	7.5	15.0	113.1	1.13	0.60
	2	300	1	37.0	37.0	37.0	13.0	3.9	50.8	21.3	7.4	12.4	91.1	2.73	0.56
	3	500	1	46.0	46.0	46.0	13.0	3.3	42.4	17.9	7.3	10.8	79.1	3.96	0.54
	4	1 000	1	80.0	80.0	80.0	13.0	2.0	26.0	11.1	7.2	7.4	52.9	5.29	0.49
	5	2 000	1	90.0	90.0	90.0	13.0	1.8	23.4	10.0	7.2	6.7	48.2	9.64	0.49
顶推船队	6	300	2	30.0	82.0	82.0	12.0	6.4	76.2	18.7	8.1	12.5	101.7	3.05	0.75
	7	500	2	42.0	108.0	108.0	12.0	5.0	60.6	15.0	8.0	10.3	83.2	4.16	0.73
	8	1 000	2	66.0	161.0	161.0	12.0	3.6	42.7	10.8	7.9	7.7	60.7	6.07	0.70
	9	2 000	2	75.0	180.0	180.0	12.0	3.2	38.6	9.8	7.9	7.0	55.4	11.07	0.70
拖驳船队	10	100	11	25.0	298.0	25.0	8.5	16.0	136.3	34.1	6.5	23.0	149.2	1.49	0.91
	11	300	6	30.0	210.0	30.0	8.5	9.0	76.6	25.5	5.6	17.1	95.7	2.87	0.80
	12	500	5	40.5	231.0	40.5	8.5	6.0	51.2	19.5	5.2	13.2	69.1	3.45	0.74
	13	1 000	3	54.0	186.0	54.0	8.5	3.1	26.3	14.2	4.5	9.6	43.5	4.35	0.61

于单船;驳船数越多,吨位流量越大;驳船数相同时,顶推船队吨位流量大于拖驳船队。

目前,顶推驳船数较少,而且航速与机动单船接近,因此,两者船运效率相当。拖带驳船数一般较多,但航速约为单船的 0.65 倍,制动性能差,在目前拖驳行驶性能条件下,船运效率低于单船。分析表明,实行船型大型化、标准化、船队化和快速化可有效提高航道通过能力。

4.4 跟驰间距模型应用

本文应用式(22)分析了江苏地区Ⅱ~Ⅵ级航道 29 种机动船型、8 种顶推船型、35 种拖驳船型共 72 种船舶(队)的船舶流特性,其中常用代表船舶(队)有 13 种。

4.4.1 交通流特性差异分析

江苏地区 13 种代表船舶(队)的船舶流特征参数的计算结果见表 3,表中 $\gamma_{q,f}=q_f/q_c$ 为畅行时饱和度; $Q_c=q_c n_b W_b$ 为最大吨位流量。4 种代表船舶(队)的流密曲线见图 7。

可以看出,由于船舶(队)尺度、速度、制动性能差异大,13 种代表船舶(队)的 q_c 最大差异 3.1 倍, Q_c 最大差异 9.8 倍,而且形态差异也大,畅行时饱和度在 0.49~0.91 之间,变化幅度较大,因此,对于多种船型的混合交通流分析需进一步深入研究。

4.4.2 吨位流量的影响因素

由图 8 可见:影响吨位流量的主要因素是驳船载重吨位;船型等级、船速相同时,船队吨位流量大

4.4.3 与传统方法比较

目前,采用苏南公式计算时,船队安全间距取 1 倍船队长度,机动单船安全间距取 2 倍单船长度,船速常取设计航速 0.8 倍左右。不同公式计算的流量比较见图 9,图中纵坐标为苏南公式与本文公式的吨位流量比。顶推船队的流量基本接近,而 100~250 t 级单船流量偏大,500~1 200 t 级偏小。船队拖驳数越少时,苏南公式计算值偏差越大,驳船数

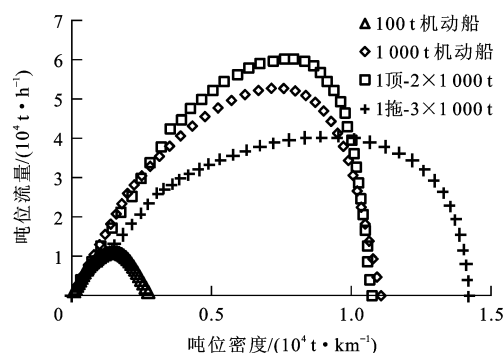


图7 代表船舶(队)的船舶流比较

Fig. 7 Comparison of ship flows for typical ships or fleets

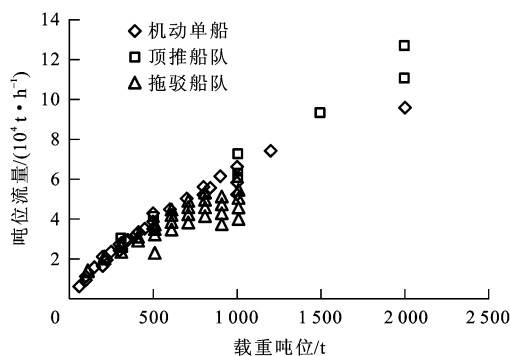


图8 驳船载重吨位与吨位流量关系

Fig. 8 Relationships between tonnages and tonnage flows of barge

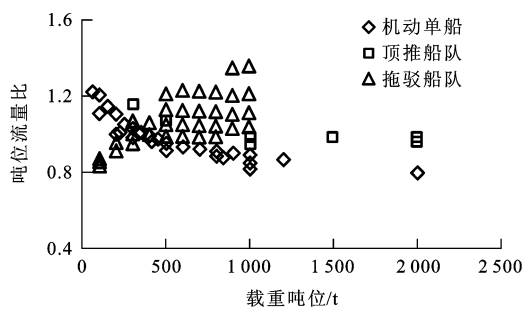


图9 流量比较

Fig. 9 Comparison of ship flows

6 艘以上时计算值逐渐相近。

5 结 语

(1)内河船舶(队)尺度大,速度低,转折密度与阻塞密度比大,流密基本三角形偏右;机动船、顶推船队可倒车制动,拖驳船队无法倒车制动,只能依靠船舶阻力“淌航制动”。内河船舶流特性的研究应充分考虑内河船舶的尺度、速度、制动性能特点。

(2)内河船舶行驶特性分析表明,江苏地区机动单船、顶推船队、拖驳船队设计时速分别为 12.5~14.0、12.0、8.5 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。制动距离分别与单船、船队、最大单驳长度相关,计算长度系数分别为

5.98、2.73、17.41。前两类船型的制动距离近似与航速平方成正比,而拖驳船队与航速的 0.85 次方成正比。

(3)通过内河船舶领域长轴经验值,验证制动操作系数 0.78 是合理的;利用 100 t 单船的分段线性模型结果校正制动操作指数,取 2.5 是合适的。

(4)在传统公式中,安全间距未考虑与航速的关系,假设拖驳船队安全间距与船队长度成正比是不合理的。跟驰间距模型充分考虑了船舶制动性能差异以及驾驶员操作经验的影响,可进一步应用于混合船型下航道通过能力及服务水平研究。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 刘绍满,王 宁,吴兆麟. 船舶领域研究综述[J]. 大连海事大学学报,2011,37(1):51-54.
LIU Shao-man, WANG Ning, WU Zhao-lin. Review of research on ship domain[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2011, 37(1): 51-54. (in Chinese)
- [2] 刘明俊,万长征. 航道通过能力影响因素的分析[J]. 船海工程,2008,37(5):116-118.
LIU Ming-jun, WAN Chang-zheng. Analysis of the factors affecting traffic capacity of navigation channel[J]. Ship and Ocean Engineering, 2008, 37(5): 116-118. (in Chinese)
- [3] 邵长丰,方祥麟. 船舶交通流的流体模型[J]. 大连海事大学学报,2002,28(1):52-55.
SHAO Chang-feng, FANG Xiang-lin. Fluid mechanics model for vessel traffic flow[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2002, 28(1): 52-55. (in Chinese)
- [4] 董 宇,姜 晔,何良德. 内河航道通过能力计算方法研究[J]. 水运工程,2007(1):59-65.
DONG Yu, JIANG Ye, HE Liang-de. Calculation method of inland waterway's throughput capacity[J]. Port and Waterway Engineering, 2007(1): 59-65. (in Chinese)
- [5] 余 劲. 基于交通流理论的内河航道通过能力研究[D]. 南京:河海大学,2007.
YU Jin. Research on inland waterway capacity based on traffic flow theory[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese)
- [6] 朱 俊,张 玮. 基于跟驰理论的内河航道通过能力计算模型[J]. 交通运输工程学报,2009,9(5):83-87.
ZHU Jun, ZHANG Wei. Calculation model of inland waterway transit capacity based on ship-following theory[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(5): 83-87. (in Chinese)
- [7] 朱 俊. 基于船舶流的交通时间阻抗模型[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2010,34(3):591-594.
ZHU Jun. Traffic impedance model based on vessel traffic flow[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Trans-

(下转第 86 页)